



Research Article

การควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมอัตราการไหล
โดยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยเอซีเซอร์โวมอเตอร์

Force Control in Electro-Hydraulic System using Pump Flow Rate Control Driven
by AC Servo Motor

ทศพล แจ้จ้อย* และ พิศาล มุลอำคา

Tossapol Jangnoi* and Pisan Moonumca

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang,
Khon Kaen 40000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-02

Revised: 2024-06-10

Accepted: 2024-06-12

Keywords:

force control;
electro-hydraulic system;
pump control;
AC servo motor

This paper studies the force control in an electro-hydraulic system that controls the hydraulic oil flow rate using a gear pump whose speed is regulated by an AC servo motor. The time response performance and power consumption of the proportional valve flow control system and the pump flow control system driven by AC servo motor were compared. The proposed system comprises an AC servo driven power unit that controls motor speed, a proportional hydraulic directional and flow control valve, and a hydraulic cylinder. A computer was used to control the electro-hydraulic system. A PID controller was used to control the valve operation and the motor speed that drives the pump. Both systems were subjected to 3 types of reference force signals which are a step force signal at 2,500 N, a sinusoidal force signal ranging from 1,500 N to 3,500 N at 0.2 Hz, and a square force signal ranging from 1,500 N to 3,500 N at 0.2 Hz. This results indicate that the pump flow control system driven by AC servo motor exhibited more accurate rise time, setting time, and steady state error responses compared to the proportional valve flow control system. However, it has an overshoot that is less favorable. The power consumption of the pump flow control system driven by AC servo motor was significantly lower than the proportional valve flow control system.

* Corresponding author.

E-mail address: tossapol.ja@rmuti.ac.th

Cite this article as:

Jangnoi, T. and Moonumca, P. 2025. Force Control in Electro-Hydraulic System using Pump Flow Rate Control Driven by AC Servo Motor. **Recent Science and Technology** 17(2): 261694.

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์โดยการควบคุมความเร็วรอบบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาและการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว โดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการศึกษารวมไปด้วย ชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โว, วาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์แบบสัดส่วน และกระบอกสูบไฮดรอลิกส์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมการทำงานของวาล์วแบบสัดส่วนและควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนบีบ ผลจากการทดลองการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ โดยการเปรียบเทียบ 2 ระบบคือ ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบแบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว ด้วยสัญญาณแรงอ้างอิง 3 แบบคือ สัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันไดที่ 2,500 นิวตัน สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ที่ย่าน 1,500 ถึง 3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิร์ต และสัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมย่าน 1,500 ถึง 3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิร์ต ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบแบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวมีเวลาขาขึ้น เวลาอยู่ตัว และค่าความผิดพลาดดีกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน แต่ยังมีส่วนพุงเกินที่น้อยกว่า ส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว จะประหยัดกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน

คำสำคัญ: การควบคุมแรง, ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์, การควบคุมบีบ, เอซีเซอร์โวมอเตอร์

1. บทนำ

ระบบไฮดรอลิกส์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากระบบไฮดรอลิกส์เป็นระบบที่มีการส่งถ่ายกำลังที่สูง เมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ โดยระบบไฮดรอลิกส์จะทำการเปลี่ยนพลังงานของไหลให้เป็นพลังงานทางกลโดยผ่านอุปกรณ์ทำงาน เช่น กระบอกสูบไฮดรอลิกส์ หรือมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ เป็นต้น การควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์สามารถทำได้หลายกรณี เช่น ควบคุมการทำงานด้วยกลไก ควบคุมการทำงานด้วยระบบไฟฟ้า และควบคุมผ่านตัวควบคุมที่โปรแกรมได้ เป็นต้น แล้วแต่การประยุกต์ใช้งาน

สำหรับการควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า จะถูกเรียกว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ โดยทั่วไปการควบคุมระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์สามารถควบคุมได้หลายกรณีตามการประยุกต์ใช้งาน เช่น การควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว หรือแรง ของอุปกรณ์ทำงาน โดยการควบคุมระบบจะเป็นการควบคุมความดันใช้งานหรืออัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ ซึ่งโดยปกติการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์สามารถควบคุมได้ 2 ลักษณะคือ การควบคุมอัตราการไหลที่วาล์ว การควบคุมที่บีบที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ หรือควบคุมทั้งสองอุปกรณ์พร้อมกัน ระบบการควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วจะเป็นการควบคุมการเปิดพื้นที่ของรูน้ำมันที่น้ำมันไหลผ่านของวาล์ว

ควบคุมอัตราการไหลตามสัญญาณควบคุมที่ส่งมาจากชุดควบคุมหรืออุปกรณ์สั่งงาน ขณะที่ระบบการควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบจะเป็นการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันที่ออกจากบีบซึ่งบีบที่ใช้จะต้องเป็นชนิดที่ปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้ โดยวาล์วที่ติดตั้งในระบบจะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ไปที่อุปกรณ์ทำงานเพียงอย่างเดียว หรือควบคุมทั้งสองก็ได้ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วจะมีผลการตอบสนองที่เร็วกว่า และมีความแม่นยำค่อนข้างสูง แต่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับระบบการควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบที่ปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้ หรือบีบที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (Induction Motor) (Sinthipsomboon *et al.*, 2011; Sangpet and Kuntanapreeda, 2013; Ming *et al.*, 2013; Jangnoi and Pinsopon, 2014) สำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยบีบที่สามารถปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้ บีบที่สามารถปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันได้มีการลงทุนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้บีบที่มีปริมาตรการจ่ายน้ำมันคงที่ และมีระบบควบคุมที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ ได้มีการศึกษาโดยนักวิจัยดังต่อไปนี้ Sinthipsomboon *et al.* (2011); Sangpet and Kuntanapreeda (2013); Jangnoi and Pinsopon (2014) ศึกษาการควบคุมแรงของระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน

ไฮดรอลิกส์ด้วยวาล์วแบบสัดส่วน สำหรับการควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มมีการศึกษาโดย Truong and Ahn (2009); Truong and Ahn (2011) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับปั๊มที่สามารถปรับปริมาตรการจ่ายน้ำมันไฮดรอลิกส์ได้ ทำให้น้ำมันไฮดรอลิกส์มีอัตราการไหลเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามภาระโหลดจริง และ Ming *et al.* (2013) ทำการทดลองการควบคุมความเร็วของกระบอกสูบที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มแบบเฟืองที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับความเร็วรอบได้ Pratumswan and Junchangpood (2013) ได้ศึกษาการควบคุมแรงและตำแหน่งที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มแบบเฟืองที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับความเร็วรอบได้ Ketelsen *et al.* (2019) ได้ทำการศึกษากการควบคุมอัตราการไหลโดยใช้ปั๊มเพื่อการประหยัดพลังงานในระบบ Ho and Le (2021) ศึกษาการประหยัดพลังงานในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์โดยใช้มอเตอร์ชนิดเอซีเซอร์โวเป็นต้นกำลังของชุดต้นกำลัง Lyu *et al.* (2021) ได้ทำการศึกษากการควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันด้วยปั๊มและวาล์วที่ใช้ร่วมกันเพื่อหาการทำงานที่เหมาะสมตามภาระโหลดจริง Liu *et al.* (2023) ทำการศึกษาชุดต้นกำลังที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว โดยใช้ตัวควบคุมแบบแบบไม่เชิงเส้นเพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว เพื่อควบคุมความดันใช้งานในระบบ Ba *et al.* (2024) ได้นำชุดต้นกำลังที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมแขนของหุ่นยนต์ด้วยกระบวนการควบคุมแรง

บทความนี้จะนำเสนอการทดลองการควบคุมแรงในระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มไฮดรอลิกส์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาของผลตอบสนองของแรงและการใช้พลังงานไฟฟ้าเทียบกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนที่มีใช้กันในปัจจุบัน โดยระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรที่ระบบไฮดรอลิกส์ไม่ต้อง

ทำงานตลอดเวลา เช่น เครื่องฉีดพลาสติก เครื่องกดอัด เป็นต้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์ประกอบไปด้วย ชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โวในการขับเคลื่อนปั๊มไฮดรอลิกส์ในการสร้างอัตราการไหล วาล์วแบบสัดส่วนที่ใช้ควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ กระบอกสูบไฮดรอลิกส์ทำงานแบบสองทิศทาง เซอร์โวล์วตัวตรวจวัดแรง (โหลดเซลล์) พร้อมชุดขยายสัญญาณ และคอมพิวเตอร์ควบคุมดังแสดงวงจรใน Figure 1 โดยการทำงานของระบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกส์เริ่มจากคอมพิวเตอร์ควบคุมจะส่งสัญญาณควบคุมผ่านการติดต่อสื่อสารไปยังชุดต้นกำลังและวาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหล กระบอกสูบเคลื่อนที่ออกไปกดสปริงเป็นเสมือนแรงต้านจำลอง แรงที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดโดยโหลดเซลล์ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างตรงปลายก้านสูบและสปริง จากนั้นส่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าผ่านชุดขยายสัญญาณ และส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อประมวลผล Figure 2 แสดงชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการศึกษานี้ และ Table 1 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบ

การทำงานของระบบแบ่งออกได้ 2 กรณี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ปั๊มจะทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ และใช้วาล์วแบบสัดส่วนในการควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์

กรณีที่ 2 ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว มอเตอร์ไฟฟ้าจะสามารถปรับความเร็วรอบได้เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ไหลออกจากปั๊ม โดยวาล์วทำหน้าที่ควบคุมทิศทางอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์เพียงอย่างเดียว

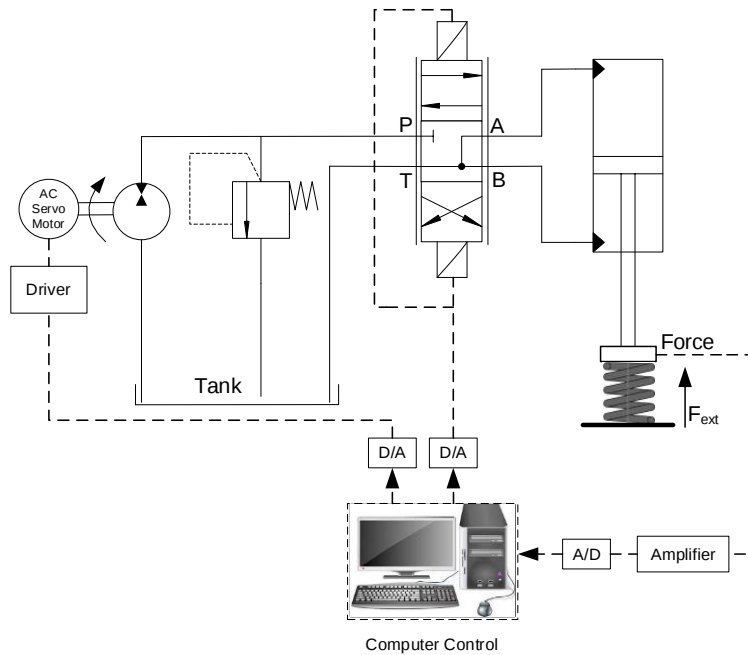


Figure 1 Schematic of Electro-Hydraulic System

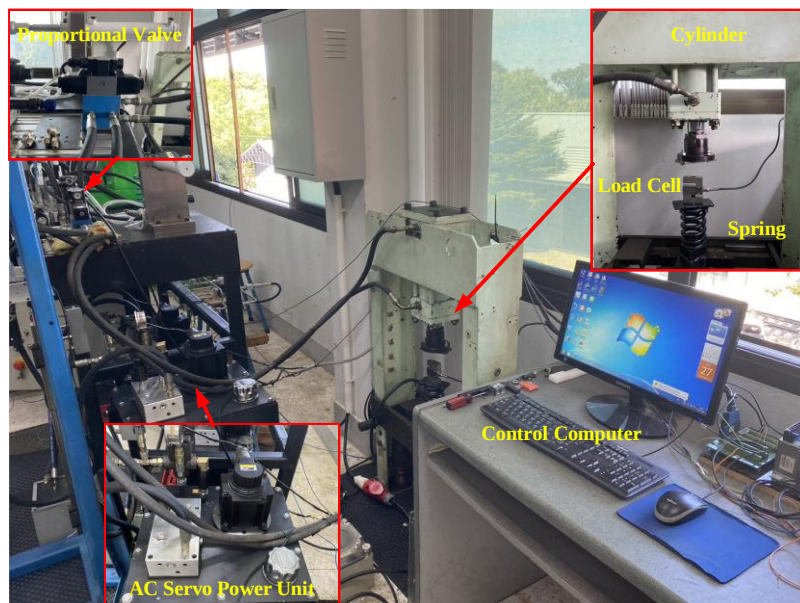


Figure 2 Electro-Hydraulic System Apparatus

จาก Figure 1 แสดงวงจรการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการศึกษานี้ การควบคุมระบบจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ควบคุมที่ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมเพื่อรับ-ส่งสัญญาณไปหาอุปกรณ์ทำงานและอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ โดยการติดต่อสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุมและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะใช้การ์ดติดต่อสื่อสาร PCI-6221 ของบริษัท National Instruments ที่มีการสุ่มข้อมูลที 0.01 วินาที สัญญาณที่ส่งไปที่วาล์ว

ควบคุมและแอซีเซอร์โวมอเตอร์จะเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดแรงดัน ช่วงระหว่าง -10 ถึง 10 โวลต์ และ ช่วงระหว่าง 0-10 โวลต์ ตามลำดับ ส่วนสัญญาณจากโหลดเซลล์ ที่ใช้ตรวจวัดแรงจะเป็นสัญญาณอนาล็อกที่ผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณของบริษัท Kyowa รุ่น WGA-100B-10 ที่ขยายแรงดันให้มีขนาด 0-10 โวลต์ เพื่อส่งสัญญาณไปที่การ์ดติดต่อสื่อสาร

Table 1 The specifications of the electro-hydraulic system components

Hydraulic gear pump	
Manufacturer:	Honor 2GG1U11R
Volumetric displacement:	11 cc/rev
Ac servo motor	
Manufacturer:	Delta
Model:	ECMA-E2135RS
Output:	2,000 rpm 7.16 Nm 1.5 Kw
Directional control valve	
Manufacturer:	Tokimec COM-3-33C-30-AN-11
Type:	4/3 Proportional
Double acting cylinder	
Bore / Rod:	40 cm / 28 cm
Stroke:	50 cm
Load cell	
Manufacturer:	Zega
Type:	S-type, 500 kg

2.2 การออกแบบตัวควบคุม

ตัวควบคุมแบบพีไอดีถูกใช้ในการออกแบบเพื่อควบคุมระบบในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิง สำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตัวควบคุมจะถูกคำนวณสัญญาณควบคุมจากค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและผลตอบสนองของระบบ การคำนวณสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอดีแสดงในสมการที่ 1

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

โดยที่ $u_{PID}(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือความผิดพลาดในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิง การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมจะใช้วิธีการของ Ziegler-Nichols ในการหาตัวควบคุมแบบพีไอดี สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอดีจะไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โว และวาล์วควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์แบบสัดส่วน การศึกษาในครั้งนี้จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี เพราะเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้อุตสาหกรรมหรือระบบทั่ว ๆ ไป ซึ่งจุดเด่นคือมีโครงสร้างที่ง่าย มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญมีการปรับค่าเกณฑ์ง่าย การออกแบบค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมทั้ง 2 ระบบจะมีการใช้ค่าเกณฑ์ที่แตกต่างกันเพราะทั้ง 2 ระบบมีการถ่ายโอนไม่เหมือนกัน (สมการถ่ายโอนไม่ได้อธิบายในบทความนี้) แต่การออกแบบค่าเกณฑ์จะดูที่ผลตอบสนองของระบบที่ดีที่สุด สำหรับการหาค่าเกณฑ์ด้วยวิธีการของ

Ziegler-Nichols จะทำการปรับค่าให้ค่าเกณฑ์ตัวควบคุมแบบสัดส่วนให้ระบบมีผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงแบบสม่ำเสมอที่สัญญาณอ้างอิง จากนั้นนำค่าเกณฑ์ไปหาตัวควบคุมตามหลักการของ Ziegler-Nichols

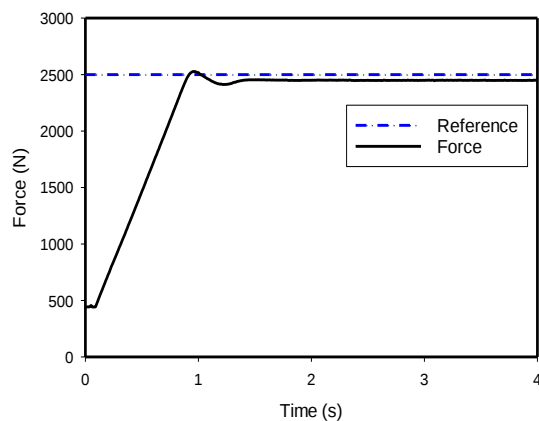
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลตอบสนองของระบบจากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับสมรรถนะผลตอบสนองเชิงเวลาในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิง และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์แบบเอซีเซอร์โว การทดลองแต่ละกรณีที่กำลังกล่าวมาข้างต้นจะใช้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่แตกต่างกัน เพราะระบบมีการควบคุมอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน ผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

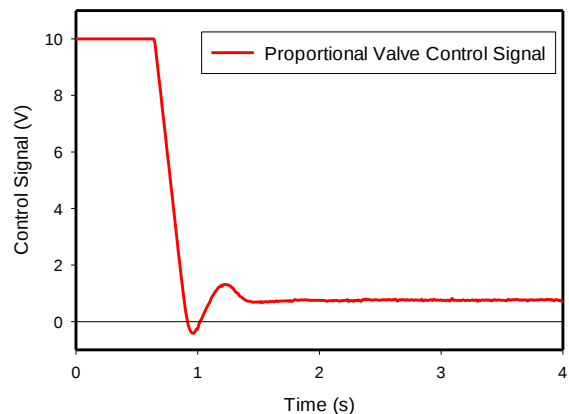
3.1 สัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันได

การติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันไดจะกำหนดให้แรงอ้างอิงมีขนาด 2,500 นิวตัน โดยรายละเอียดของผลการทดลองของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โวมียังดังต่อไปนี้

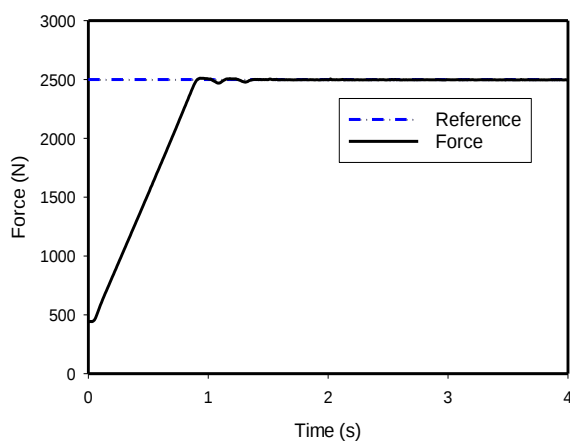
Figure 3 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงแบบขั้นบันไดสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p=0.15$ $K_i=0.001$ และ $K_d=0.00015$ ผลตอบสนองของแรงเชิงเวลาที่มีค่าเวลาขาขึ้น (Rise Time) 0.63 วินาที มีค่าเวลาอยู่ตัว (Setting Time) 0.92 วินาที และมีค่าความผิดพลาดผลตอบสนองของแรงที่สภาวะคงตัว (Steady State Error) ประมาณ 50.22 นิวตัน หรือประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ผลตอบสนองมีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว เพราะวาล์วควบคุมที่ควบคุมการเลื่อนของแกนวาล์ว เพื่อเปิดรูน้ำมัน ไม่สามารถเลื่อนแกนวาล์วจากย่านที่วาล์วไม่สามารถทำงานได้ (Dead Band Zone) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Jangnoi and Pinsopon (2018) จึงทำให้ไม่มีอัตราการไหลของน้ำมันไปที่กระบอกสูบ ถึงแม้ว่าสัญญาณควบคุมจะส่งมาที่วาล์วก็ตามดังแสดงใน Figure 3 (b) โดยสัญญาณควบคุมที่ช่วงสภาวะชั่วครู่มีค่าสูงสุดที่ 10 โวลต์



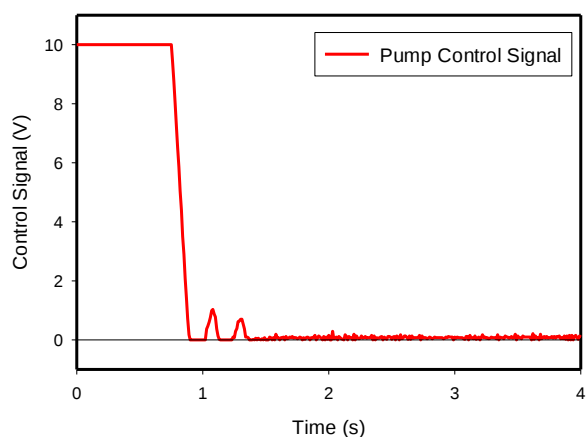
(a) Force Response



(b) Control Signal

Figure 3 Output response of step reference for valve flow control system

(a) Force Response



(b) Control Signal

Figure 4 Output response of step reference for pump flow control system

Figure 4 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงแบบขั้นบันไดสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊ม โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีค่า $K_p=0.3$ $K_i=0.05$ และ $K_d=0.002$ ผลตอบสนองของแรงมีค่าเวลาขาขึ้น 0.6 วินาที มีค่าเวลาอยู่ตัว 0.9 วินาที และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวประมาณ 4.69 นิวตัน หรือประมาณ 0.18 เปอร์เซ็นต์ ผลตอบสนองมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน เพราะวาระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มไม่มีย่านที่วาล์วไม่มีอัตราการไหล เนื่องจากวาล์วจะเปิดพื้นที่ให้น้ำมันไหลผ่านมากที่สุดตลอดเวลา โดยอัตราการไหลจะถูกควบคุมที่ความเร็วรอบของปั๊ม โดยสัญญาณควบคุมดังแสดงใน Figure 4 (b) มีลักษณะคล้ายกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน (Figure 3 (b))

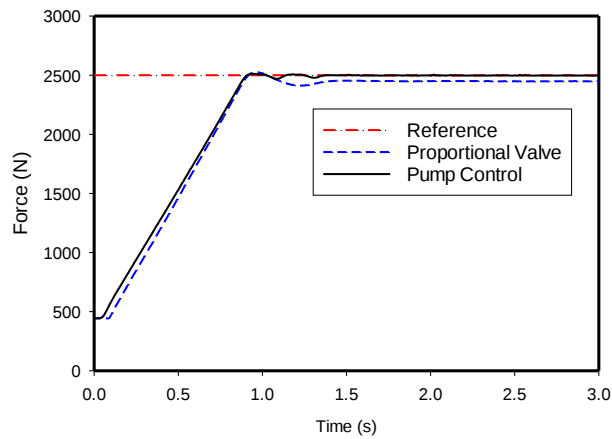
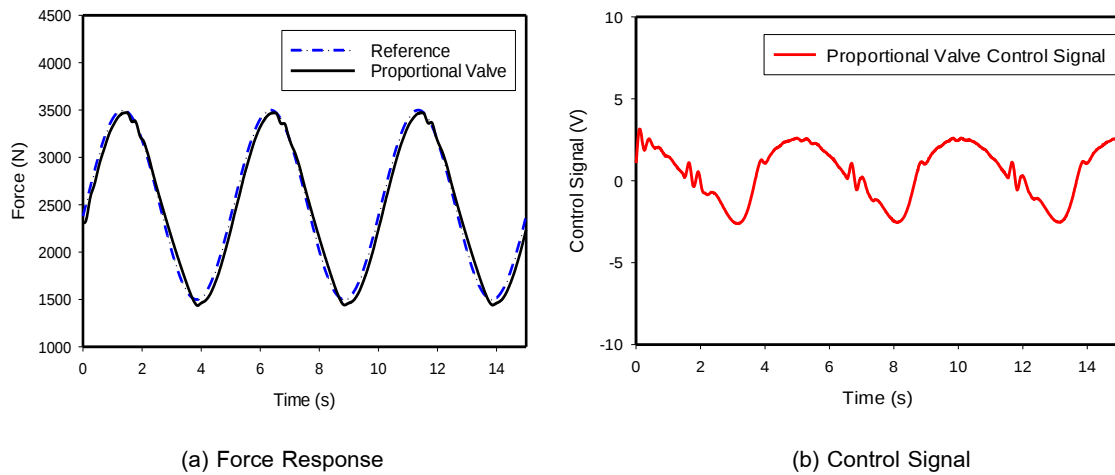


Figure 5 Output response of step reference of valve and pump flow control system



(a) Force Response

(b) Control Signal

Figure 6 Output response of sine reference for valve flow control system

Figure 5 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงแบบขั้นบันไดของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ได้อธิบายผลที่ผ่านมา

3.2 สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์

การทดลองควบคุมระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอชไอซีเออร์ไอที สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ที่มีขนาดระหว่าง 1,500-3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิรตซ์

Figure 6 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์สำหรับระบบ

ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน โดยค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้ในการควบคุมระบบมีค่า $K_p=0.198$ $K_i=0.00015$ และ $K_D=0.001$ ผลตอบสนองของแรงในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงมีการสั่นในขณะสัญญาณอ้างอิงลดลงมากกว่าการควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ผลตอบสนองของระบบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error) ที่สภาวะคงตัวประมาณ 96.90 นิวตัน Figure 6 (b) แสดงสัญญาณควบคุมที่ควบคุมวาล์วมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอ้างอิงโดยมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ +5 ถึง -5 โวลต์

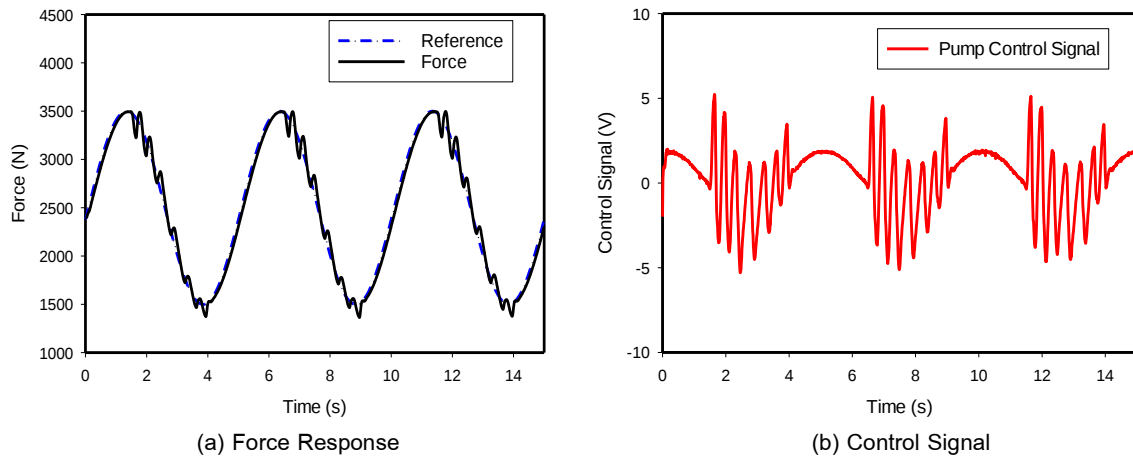


Figure 7 Output response of sine reference for pump flow control system

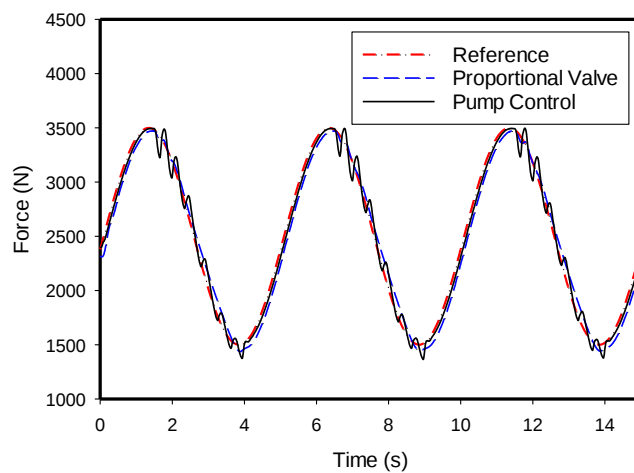


Figure 8 Output response of sine reference of valve and pump flow control system

Figure 7 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊ม โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p=0.25$ $K_i=0.009$ และ $K_d=0.003$ และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่สภาวะคงตัวประมาณ 77.48 นิวตัน จากผลการทดลองจะมีการสั่นของผลตอบสนองช่วงสัญญาณแรงอ้างอิงด้านข้างเนื่องจากมีแรงปฏิกิริยาจากการยืดกลับของสปริงที่ใช้เป็นโหลดจำลอง Figure 7 (b) แสดงสัญญาณควบคุมที่ควบคุมวาล์วมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอ้างอิงโดยมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ +5 ถึง -5 โวลต์ คล้ายกับการควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว แต่จะมีสัญญาณตอนก้านสูบเลื่อนเข้าจะมีการสั่นของสัญญาณมากกว่า

การเปรียบเทียบผลตอบสนองในการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วและระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มแสดงดัง Figure 8

3.3 สัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยม

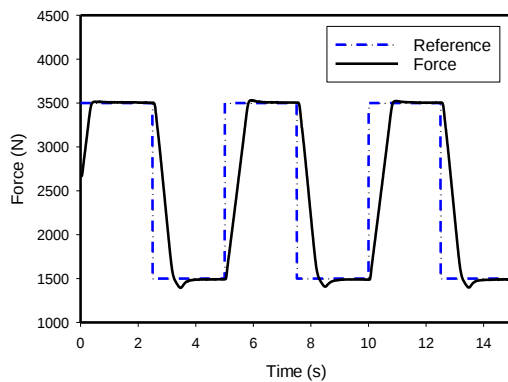
สัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมมีขนาดระหว่าง 1,500-3,500 นิวตัน ที่ความถี่ 0.2 เฮิรตซ์ การทดลองควบคุมระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โว

Figure 9 (a) แสดงผลตอบสนองของแรงแบบสี่เหลี่ยมสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ซึ่งค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้ในการควบคุมระบบคือ $K_p=0.050$ $K_i=0.020$ และ $K_d=0.001$ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองประมาณ 639.78 นิวตัน แรงปฏิกิริยาจากการยืดกลับของสปริงช่วยทำให้เกิดส่วนพุงเกินขณะกระบอกสูบเลื่อนเข้า ซึ่งมีค่าส่วนพุงเกินประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ สัญญาณควบคุมมีค่าแรงดันคล้ายกับการติดตามสัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์บันได และมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคล้ายกับการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบไซน์ดังแสดงใน Figure 9 (b)

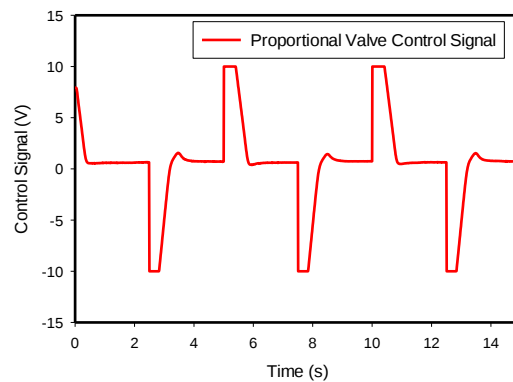
Figure 10 (a) แสดงผลการตอบสนองของแรงแบบสี่เหลี่ยมสำหรับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว โดยใช้ค่าเกนของตัวควบคุม $K_p=0.030$ $K_i=0.055$ และ $K_d=0.001$ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองประมาณ 485.20 นิวตัน ส่วนฟังก์ชันของระบบมีลักษณะคล้ายกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ซึ่งมีค่า

เปอร์เซ็นต์ส่วนพุงเกินประมาณ 14.4 เปอร์เซ็นต์ โดยผลตอบสนองเวลาชั่วครู่ดีกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน

Figure 11 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงด้วยสัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมของระบบควบคุมอัตราการไหลทั้ง 2 ระบบที่ทำการศึกษาในครั้งนี้

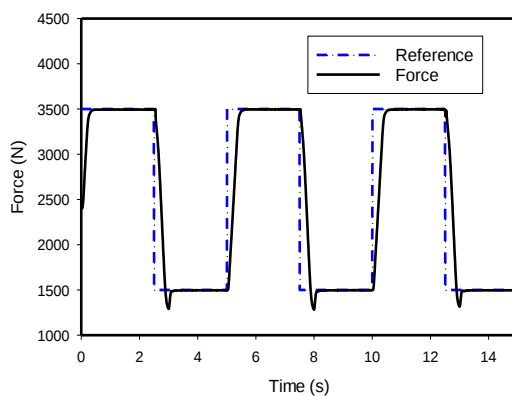


(a) Force Response

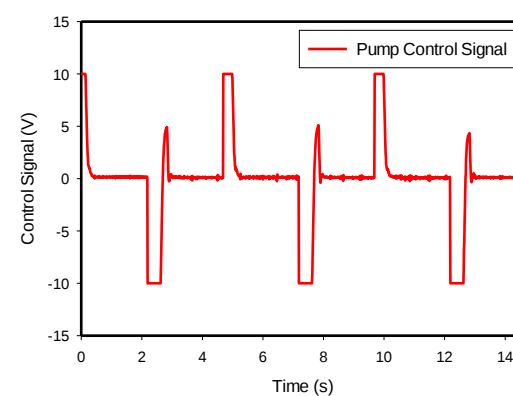


(b) Control Signal

Figure 9 Output response of square reference for valve flow control system



(a) Force Response



(b) Control Signal

Figure 10 Output response of square reference for pump flow control system

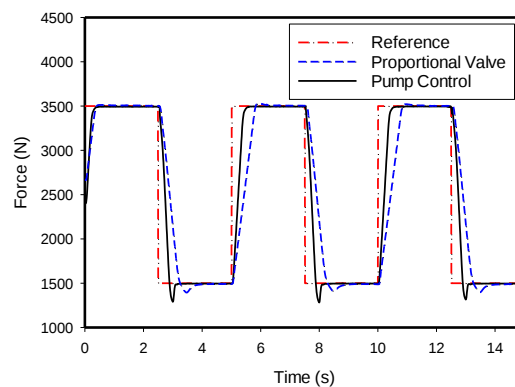


Figure 11 Output response of square reference of valve and pump flow control system

Table 2 Power Consumption

	Step		Sine		Square	
	Valve	Pump	Valve	Pump	Valve	Pump
Power (KWh)	0.024	0.011	0.023	0.005	0.019	0.008

3.4 การใช้พลังงานไฟฟ้า

ผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน และระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โว การเก็บผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในการศึกษาในครั้งนี้ จะไม่สามารถนำสัญญาณการวัดออกมาเครื่องมีวัดได้ แต่ตัวอุปกรณ์สามารถเก็บผลการทดลองตลอดการทดลองและแสดงค่าเฉลี่ยออกมาเพียงอย่างเดียว ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าแต่ละการทดลองแสดงดัง Table 2 สำหรับการทดลองจะตั้งค่าความดันใช้งานของระบบที่ 40 บาร์ทั้ง 2 กรณี เพราะเป็นความดันที่ระบบสามารถทำงานได้

จาก Table 2 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โวทุกกรณี จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าพบว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Xu *et al.* (2010); Ming *et al.* (2013); Pratumswan and Junchangpood (2013) โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอซีเซอร์โวเทียบกับระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วแบบสัดส่วน ที่สัญญาณแรงอ้างอิงแบบขั้นบันไดลดลงประมาณ 54.17 เปอร์เซ็นต์ สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์ลดลงประมาณ 78.26 เปอร์เซ็นต์ และสัญญาณแรงอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมลดลงประมาณ 57.89 เปอร์เซ็นต์ ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วน้ำมันที่ไหลออกจากปั๊มไม่ได้นำไปใช้งานทั้งหมด มีส่วนหนึ่งไหลกลับถึงผ่านวาล์วระบายความดัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เพราะมอเตอร์ที่ใช้ขับปั๊มมีการทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ตลอดเวลา ส่วนการควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่นำเสนอในการศึกษาในครั้งนี้อัตราการไหลออกจากปั๊มจะถูกควบคุมด้วยมอเตอร์ที่ขับปั๊มที่จะเปลี่ยนความเร็วรอบตามภาระไหล จึงทำให้มีการพลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว

4. สรุป

การศึกษาในครั้งนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โว โดยทดลองการทำงานด้วยการควบคุมความเร็วรอบเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบ ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มอย่างง่ายสามารถที่จะสร้างขึ้นได้โดยใช้ปั๊มแบบเฟืองที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยการควบคุมอัตราการไหลใช้การควบคุมความเร็วรอบของปั๊มที่ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งระบบที่สร้างขึ้นจะมีการควบคุมที่ง่ายกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มที่ปรับอัตราการไหลได้

2. ระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวมีสสมรรถนะของผลตอบสนองเชิงเวลา ค่าเวลาขาขึ้น ค่าเวลาอยู่ตัว และมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวดีกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยวาล์วแบบสัดส่วน แต่ยังมีส่วนพุงเกินของผลตอบสนองที่ยังมากกว่า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาที่ดีเพราะอัตราการไหลของน้ำมันไหลไหลออกจากปั๊มจะไปที่อุปกรณ์ทำงานทั้งหมด และมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวที่ควบคุมอัตราการไหลสามารถสร้างอัตราการไหลได้ทุกย่านสัญญาณควบคุม

3. ระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยวาล์วแบบสัดส่วนในทุกกรณีเช่นกัน เนื่องจากระบบควบคุมอัตราการไหลด้วยปั๊มควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวมีความเร็วรอบที่ไม่คงที่ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามสภาวะการทำงานจริง จึงทำให้ไม่มีน้ำมันส่วนเกินไหลกลับถึงผ่านวาล์วระบายความดัน จึงทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าประหยัดพลังงานไฟฟ้า

4. การศึกษาระบบควบคุมอัตราการไหลน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยปั๊มที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเอซีเซอร์โวที่ใช้ตัวควบคุมที่มีค่าเกนคงที่ได้ทดสอบสมรรถนะเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นการศึกษาดังกล่าว

ที่สามารถปรับค่าเกณฑ์ได้ตามภาระโหลดจริงควรจะมีการศึกษาต่อไป เพื่อเทียบกับตัวควบคุมที่มีค่าเกณฑ์ที่

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เพราะได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ทางผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

- Ba, K., Wang, Y., He, X., Wang, C., Yu, B., Liu, Y. and Kong, X. 2024. Force Compensation Control for Electro-Hydraulic Servo System with Pump Valve Compound Drive via QFT–DTOC. **Chinese Journal of Mechanical Engineering** 37(27):1-19.
- Ho, T. H. and Le, T. D. 2021. Development and Evaluation of Energy-Saving Electro-Hydraulic Actuator. **Actuators** 10(302): 1-27.
- Jangnoi, T. and Pinsopon, U. 2014. Electro-Hydraulic Force Control using Fuzzy Self-Tuning PID Controller, pp. 109. *In The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering*. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok.
- Jangnoi, T. and Pinsopon, U. 2018. Velocity Control of Electro- Hydraulic Pump Control System using Gear Pump. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control** 14(6): 2307-2323.
- Ketelsen, S., Padovani, D., Andersen, T.O., Ebbesen, M.K. and Schmidt, L. 2019. Classification and Review of Pump-Controlled Differential Cylinder Drives. **Energies** 12(1293): 1-27.
- Liu, R., Wang, Z., Jia, P., Yan, G., Zhang, T., Jia, C. and Chen, G. 2023. Research on Pressure Control of an Electro-Hydraulic Servo System Based on Sliding-Mode Variable-Structure Direct Torque Control. **Processes** 11(92):1-27.
- Lyu, L., Chen, Z. and Yao, B. 2021. Advanced Valves and Pump Coordinated Hydraulic Control Design to Simultaneously Achieve High Accuracy and High Efficiency. **IEEE Transactions on Control Systems Technology** 29(1): 236-248.
- Ming, X., Bo, J., Guojin, C. and Jing, N. 2013. Speed-Control of Energy Regulation Based Variable-Speed Electro- hydraulic Drive. **Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering** 59(7-8): 433-442.
- Pratumsuwan, P. and Junchangpood, A. 2013. Force and Position Control in the Electro-Hydraulic System by using a MIMO Fuzzy Controller, pp. 1462-1467. *In 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, Melbourne, Australia.
- Sangpet, T. and Kuntanapreeda, S. 2013. Force control of an electrohydraulic actuator using a fraction order controller. **Asian Journal of Control** 15(4): 1-9.
- Sinthipsomboon, K., Hunsacharoonroj, I., Khedari, J., Po-ngaen, W. and Pratumsuwan, P. 2011. A Hybrid of Fuzzy and Fuzzy self-tuning PID Controller for Servo Electro-Hydraulic System, pp. 220-225. *In 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, Beijing, China.
- Truong, D.Q. and Ahn, K.K. 2009. Force control for hydraulic load simulator using self-tuning grey predictor-fuzzy PID. **Mechatronic** 19: 233-246.
- Truong, D.Q. and Ahn, K.K. 2011. Force control for press machines using an online smart tuning fuzzy PID based on a robust extend Kalman filter. **Expert System with Applications** 38: 5879-5894.
- Xu, M., Jin, B., Yu, Y., Shen, H. and LI, W. 2010. Using Artificial Neural Networks for Energy Regulation Based Variable-speed Electrohydraulic Drive. **Chinese Journal of Mechanical Engineering** 23(3): 327-335.